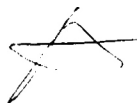


0- 779717

На правах рукописи



Волчков Станислав Олегович

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ГИГАНТСКИЙ МАГНИТНЫЙ  
ИМПЕДАНС НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР НА  
ОСНОВЕ 3d-МЕТАЛЛОВ

01.04.11 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2009

Работа выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов и в отделе магнетизма твердых тел НИИ физики и прикладной математики ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А. М. Горького».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
**Курляндская Галина Владимировна**

Официальные  
оппоненты: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Бобенни Николай Георгиевич**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Медведев Михаил Владимирович**

Ведущая организация: **ГОУ ВПО «Иркутский  
государственный университет»**

Защита состоится 10 декабря в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А. М. Горького» по адресу: 620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, д. 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А. М. Горького».

Автореферат разослан 9 ноября 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000621090

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Н. В. Кудреватых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Особенности магнитной анизотропии, процессы квазистатического и динамического перемагничивания, транспортные и магнитотранспортные свойства наноструктурированных систем на основе 3d-металлов представляют широкую область научного знания, сформировавшуюся в последние годы на стыке таких дисциплин, как физика магнитных явлений, физика конденсированного состояния и физическое материаловедение. К числу явлений, вызывающих особый интерес исследователей относится магнитный импеданс. Магнитный импеданс - это изменение комплексного сопротивления ферромагнитного проводника под действием внешнего квазистатического магнитного поля [1-3]. В 1994 году было обнаружено, что некоторых магнитомягких материалах относительное изменение импеданса превышает 100 % в сравнительно малых магнитных полях (менее 1-10 Э). Такая разновидность эффекта получила название «гигантский магнитный импеданс» (ГМИ). Чувствительность ГМИ к внешнему магнитному полю на сегодняшний день достигает 500%/Э. Однако для более полного понимания физических процессов, протекающих в магнитомягких материалах с высокой чувствительностью эффекта МИ и для реализации этого эффекта в технологических приложениях необходимы целенаправленные исследования планарных магнитных структур и элементов на их основе, ориентированные на оптимизацию структурно-химических параметров, особенностей эффективной магнитной анизотропии, процессов перемагничивания и параметров ГМИ-откликов. Возможность использования гигантского магнитного импеданса как дополнительного метода исследования ферромагнитных структур все более входит в повседневную научно-исследовательскую практику.

**Цель работы:** установление связи гигантского магнитного импеданса с магнитными свойствами неоднородных планарных структур на основе 3d-металлов с варьируемыми физико-химическими характеристиками.

Цель работы обусловила следующие **задачи**:

1. Исследовать планарные структуры, исходно полученных методом быстрой закалки, варьируя степень их магнитной неоднородности:

- влияние малой пластической деформации на магнитные свойства и ГМИ аморфных лент сплава на основе Со;

- магнитные свойства и ГМИ аморфных лент сплава на основе Со, не подверженных термическим воздействиям;

- магнитные свойства и ГМИ аморфных лент сплава на основе Со, подверженных термическим воздействиям для частичной нанокристаллизации;

- магнитные свойства и ГМИ нанокристаллических лент сплава на основе Fe, подверженных термической и термомагнитной обработке.

2. Исследовать магнитные свойства и ГМИ пленочных структур ферромагнетик/немагнитный проводник/ферромагнетик при различной геометрии слоев, в том числе элементов с незамкнутым и замкнутым магнитным потоком. Произвести оценки геометрических параметров данных структур, с точки зрения их приложений для детектирования биоэлементов с суперпарамагнитными маркерами.

3. Экспериментально показать возможность детектирования неоднородных магнитных полей рассеяния, создаваемых ферромагнитными модельными объектами, с помощью ГМИ в быстрозакаленных лентах на основе Со и пленочных структурах ферромагнетик/немагнитный проводник/ферромагнетик.

#### Объекты исследования:

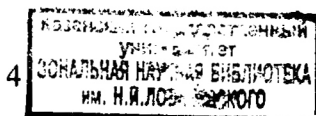
- аморфные ленты сплавов  $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ ,  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ,  $\text{Fe}_4\text{Co}_{66}\text{Mo}_2\text{Si}_{16}\text{B}_{12}$ ,  $\text{Fe}_{2.5}\text{Co}_{64.5}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ ;

- нанокристаллические ленты  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ;

- пленочные планарные структуры  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ ,  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ ;

#### Научная новизна:

1. Впервые описано влияние малой пластической деформации на магнитные свойства и ГМИ быстрозакаленных лент сплава  $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ .





2. Впервые установлена связь ГМИ с особенностями наведенной магнитной анизотропии в нанокристаллических лентах сплава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ , подвергшихся термическим воздействиям, в том числе и в присутствии внешнего магнитного поля.

3. Впервые определены особенности ГМИ и его связь с магнитной структурой пленочных элементов  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ , обладающих различным соотношением геометрических параметров магнитных и немагнитного слоёв. Показано, что для элементов с незамкнутым магнитным потоком в интервале низких частот (до 150 МГц) характерны более высокие величины ГМИ эффекта, чем для элементов с замкнутым магнитным потоком.

### **Практическая ценность**

Полученные результаты могут быть использованы при создании высокочувствительных сенсоров магнитного поля, а также как физическая основа методики косвенной оценки структурного состояния ферромагнетиков с помощью ГМИ. Конкретные практически значимые результаты состоят в следующем.

1. Показано, что дозированная пластическая деформация позволяет целенаправленно изменять положение максимума ГМИ на шкале магнитного поля, что может быть использовано для создания устройств, где необходима высокая чувствительность в определенной области магнитного поля.

2. Определены эффективные параметры ГМИ-пленочного элемента для его возможного использования при детектировании крупных биоконпонент.

3. Показана возможность детектирования ферромагнитных модельных объектов, с помощью ГМИ-элементов в виде аморфных лент и пленочных структур на основе количественной оценки полей рассеяния, что может быть использовано в методиках неразрушающего контроля и в биомедицинских приложениях.

### **Достоверность**

Представленные в работе экспериментальные исследования были проведены с использованием современных и апробированных методик на высокоточных приборах и установках,

характеризующихся возможностью статистики, анализом погрешностей полученных данных. Компьютерное моделирование выполнено с помощью сертифицированного лицензионного программного обеспечения. Результаты, представленные в диссертации, не имеют принципиальных расхождений с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других исследователей, опубликованными в открытой печати.

#### **Апробация работы:**

Материалы диссертационной работы были представлены на 14 научных конференциях: Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКСФ-12 (март 2006, Новосибирск, Россия) 6th European Conference on Magnetic Sensor and Actuators, EMSA 2006 (июль 2006, Bilbao, Spain); Всероссийская молодежная конкурс-конференция «Электроника – 2006» (ноябрь 2006, Москва, Россия); Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКСФ-13 (март 2007, Ростов-на-Дону, Россия); IV Российская научно-техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов», ФСМиС-IV (ноябрь 2007, Екатеринбург, Россия); Московский международный симпозиум по магнетизму, MISM (июнь 2008, Москва, Россия); 8th European Conference on Magnetic Sensor and Actuators, EMSA 2008 (июль 2008, Caen, France); Euro-Asian Symposium «Magnetism on a Nanoscale», EASTMAG 2007 (август 2007, Казань, Россия); XXIV Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля» (апрель 2009, Екатеринбург, Россия); Третья Всероссийская конференция по наноматериалам, НАНО 2009 (апрель 2009, Екатеринбург, Россия); International Magnetism Conference INTERMAG 2009 (май 2009, Sacramento, USA); Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (июнь 2009, Москва, Россия); 19th Soft Magnetic Materials Conference, SMM 19 (сентябрь 2009, Torino, Italy).

**Публикации и личный вклад автора:** По теме работы опубликовано 6 статей в ведущих научных рецензируемых журналах, определенных Высшей Аттестационной Комиссией, 4 статьи в сборниках с ISBN, 10 тезисов докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата. Все основные

результаты были получены лично автором. Выбор направления исследования, формулировка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем Курляндской Г.В.. Образцы были получены Потаповым А.П. и Губернаторовым В.В. в ИФМ УрО РАН и Лепаловским В.Н. в ОМТТ НИИ ФПМ УрГУ. Экспериментальные исследования были проведены совместно с соавторами работ Лукшиной В.А., Сваловым А.В., Семировым А.В., Букреевым Д.А., Монсеевым А.А., D. de Cos, M. Rivas.

**Структура:** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, трех приложений и списка используемой литературы. Объем составляет 233 страницы, включая 93 рисунка, 13 таблиц и 213 библиографических наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во *введении* обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель, представлены научная новизна и практическая ценность.

В *первой главе* дается определение гигантского магнитного импеданса, рассматриваются примеры феноменологических описаний, теоретических моделей эффекта и приводятся результаты экспериментальных исследований в планарных структурах на основе 3d-металлов. Представлены методики измерения и примеры технологических приложений эффекта. Поставлены задачи исследования.

Во *второй главе* представлены физико-химические характеристики объектов исследования, методики получения, виды механического/термического воздействия на образцы. Описаны методики исследования структурного состояния, геометрических характеристик, магнитных свойств, магнитной доменной структуры, электрических и магнитоимпедансных свойств.

Быстрозакаленные аморфные ленты были получены методом спиннингования без приложения внешнего магнитного поля. Образцы представляли собой прямоугольные полоски толщиной от 18 до 28 мкм, шириной от 0,75 до 1 мм; длина 50 мм была выбрана для минимизации размагничивающего поля. Они были подвергнуты: - малой пластической деформации вдоль длинной

стороны методом постепенного обжата в гладких валках прокатного стана; - релаксационным отжигом ниже температуры кристаллизации; отжигу на частичную нанокристаллизацию; - отжигу на нанокристаллизацию; -отжигу на нанокристаллизацию с последующей термомагнитной обработкой (ТМО).

Структурное состояние образцов было исследовано с помощью рентгеновской дифрактометрии с использованием Siemens Diffractometer в  $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Петли магнитного гистерезиса измерялись с использованием микроверметра и вибромагнетометра. Продольный магнитный импеданс был измерен на оригинальной автоматизированной установке, созданной в ходе работы над диссертацией.

Пленочные структуры получены методом высокочастотного ионно-плазменного распыления в атмосфере Ag. Однородное магнитное поле напряженностью 100 Э обеспечивало создание плоскостной магнитной анизотропии с ОЛН, ориентированной перпендикулярно длинной стороне элементов. Формирование элементов осуществлялось с использованием маскирования. Образцы представляли собой трехслойные элементы ферромагнетик/немагнитный проводник/ферромагнетик с длиной 10 мм. Варьировались: - ширина ферромагнитного слоя от 1 до 12 мм при постоянной ширине немагнитного слоя 1 мм; - ширина немагнитного слоя от 0,2 до 0,5 мм, формируя структуру с замкнутым и незамкнутым магнитным потоком; -ширина немагнитного слоя, совместно с толщиной магнитного слоя. Геометрия контролировалась оптической микроскопией и контактной профилометрией. Поверхностные петли магнитного гистерезиса измерялись с помощью методики на основе магнитооптического эффекта Керра. Визуализация магнитной доменной структуры произведена с помощью метода порошковых фигур Акулова-Биттера в нулевом внешнем магнитном поле. Продольный магнитоимпедансный эффект был измерен посредством методики импедансного спектрального анализа с использованием линии типа «микрострейп» и методик сверхвысокочастотной схемотехники..

Модельные ферромагнитные объекты для детектирования полей рассеяния были изготовлены в виде параллелепипедов различных размеров из нетекстурированной холоднокатаной

высокоуглеродистой стали, используемой в сердечниках трансформаторов бытовых электроприборов. Состав объектов был определен с помощью стандартного метода EDX (Energy dispersive X-ray spectroscopy) после механической полировки поверхности: в вес. %: Fe – 96.8%, C – 2.0 %, Mn – 0.7%, Si – 0.4 %, Cr – 0.1 %. Условное отображение суперпозиции полей рассеяния от ферромагнитного модельного объекта и внешнего магнитного поля визуализировались с помощью коммерческой ферромагнитной жидкости Ferrotec®.

Целью третьей главы является установление связи гигантского магнитоимпедансного эффекта с магнитными свойствами неоднородных планарных структур на основе 3d-металлов (Fe и Co), исходя из полученных методом быстрой закалки, с вариацией их структурного состояния (рис. 1).



Рис.1. Диаграмма, описывающая структурные метастабильные состояния быстрозакаленных лент, исследованных в данной работе

В разделе 3.1. были исследованы магнитные свойства и ГМИ быстрозакаленных лент сплава  $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  в исходном состоянии и в состояниях с разной степенью малой пластической деформации. Образцы, как в исходном, так и деформированном

состояниях имели аморфную структуру. В исходном состоянии аморфные ленты  $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  представляют собой материал с низкой коэрцитивной силой, высокой магнитной проницаемостью и эффективной магнитной анизотропией с ОЛН вдоль длинной стороны ленты. Форма кривых ГМИ указывает на наличие областей с продольной магнитной анизотропией с незначительной дисперсией локальных осей легкого намагничивания в центральной части образца и поперечной магнитной анизотропии в приповерхностных областях.

С повышением степени деформации коэрцитивная сила и величина поля насыщения увеличивается; форма продольной квазистатической петли магнитного гистерезиса усложняется, указывая на изменения процессов намагничивания с усилением роли процессов вращения. Величина ГМИ-эффекта и гистерезис ГМИ-петель с увеличением степени пластической деформации уменьшается, пик ГМИ сдвигается в область больших магнитных полей (Табл. 1). Величины чувствительности активного сопротивления, реактивного сопротивления и импеданса уменьшаются с десятков процентов до единиц процентов. Возможно, при малой пластической деформации появляются дополнительные упругие напряжения  $\sigma$ , которые вносят вклад в наведенную магнитную анизотропию. Кроме того, пластическая деформация может влиять на средний размер локальных структурных неоднородностей в образце и, как следствие, модифицировать процесс движения доменных стенок. Переменное поле, создаваемое зондирующим током, может увеличивать энергию доменных стенок и их искажения.

Табл. 1. Максимальные относительные значения полного импеданса ( $\Delta Z/Z_{\max}$ ), активного сопротивления ( $\Delta R/R_{\max}$ ), гистерезис ГМИ-петель ( $\Gamma_{\Delta Z/Z}$  и  $\Gamma_{\Delta R/R}$ ), максимальное значение ГМИ на шкале магнитного поля ( $H_{\text{пик}}$ ), коэрцитивная сила ( $H_C$ ), аморфных лент  $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  при различной степени пластической деформации

Степень деформации (%)	$\Delta Z/Z_{\max}$ (%)	$\Delta R/R_{\max}$ (%)	$\Gamma_{\Delta Z/Z}$ (%)	$\Gamma_{\Delta R/R}$ (%)	$H_{\text{пик}}$ (Э)	$H_C$ (Э)
0	140	310	40	85	0.3	0.01
0.6	110	210	10	12	1	0.04
1.0	80	140	7	8	1.3	0.09

Высокая чувствительность относительного изменения активного сопротивления говорит о преимуществе принципа фазового детектирования и разделенного измерения компонент импеданса для практических приложений эффекта ГМИ.

В разделе 3.2. исследованы магнитные свойства и ГМИ аморфных лент сплава  $\text{Fe}_{2.5}\text{Co}_{64.5}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , полученных методом быстрой закалки и не подверженных дополнительным термическим воздействиям. Предложена схема описания ГМИ-кривых сложной формы и их эволюции, основанная на выделении характерных точек. Показана принципиальная возможность получения высокой чувствительности ( $\sim 300 \text{ \%}/\text{Э}$ ) в заданном интервале магнитных полей без использования дополнительных термических воздействий.

В разделе 3.3. исследованы магнитные свойства и ГМИ лент сплава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{66}\text{Mo}_2\text{Si}_{16}\text{B}_{12}$ , полученных методом быстрой закалки и подверженных отжигу на частичную нанокристаллизацию ( $T_{\text{отж}} = 510 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{отж}} = 20\text{-}30 \text{ мин}$ ). Показано, что частичная нанокристаллизация приводит к значительному снижению максимальной величины ГМИ-эффекта, росту ГМИ-гистерезиса и появлению асимметрии ГМИ-кривых во внешнем магнитном поле. Данный факт можно объяснить выпадением нанокристаллитов  $\text{Co}$  и сплава  $\text{Co}_3\text{B}$  ( $\sim 50\text{-}100 \text{ нм}$ ), которые представляют собой жесткие магнитные фазы, находящиеся в магнитомягкой матрице с отсутствием кристаллографической структуры. Частичная нанокристаллизация образцов, начинающаяся с поверхности, аналогична наличию приповерхностного слоя с высокой дисперсией локальных осей эффективной магнитной анизотропии, наблюдаемой в быстрозакаленных аморфных лентах, не подверженных дополнительным термическим воздействиям.

В разделе 3.4. исследованы магнитные свойства, структурное состояние, температурная зависимость электросопротивления и ГМИ нанокристаллических лент сплавов  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ , полученных обработкой в трех различных режимах:

- быстрозакаленные аморфные ленты  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ , подвергались термическому воздействию в форвакууме при температуре  $520^\circ \text{C}$  в течение 1 часа. Постоянное магнитное поле не прикладывалось (образец S1);

- быстрозакаленные аморфные ленты  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ , подвергались термическому воздействию в форвакууме при температуре  $520^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Постоянное магнитное поле напряженностью 3 кЭ в процессе термического воздействия прикладывалось поперечно образцу (образец S2);

- быстрозакаленные аморфные ленты  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  подвергались термическому воздействию в форвакууме при температуре  $520^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Постоянное магнитное поле на первом этапе термического воздействия не прикладывалось. Затем тот же образец подвергался термическому воздействию в форвакууме при температуре  $520^\circ\text{C}$  в течение 1 часа в постоянном поперечном магнитном поле в плоскости ленты напряженностью 3 кЭ (образец S3).

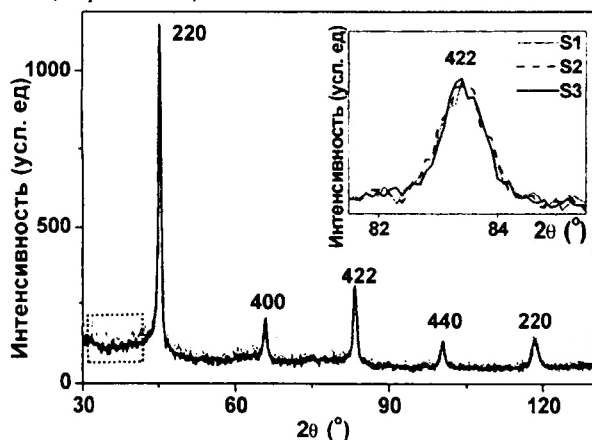


Рис. 2

Рентгеновская дифрактограмма лент сплава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  после ТМО в трех режимах. Величина нанокристаллитов  $D \approx 12 \pm 1$  нм. На вставке показан фрагмент в интервале двойного угла от  $82$  до  $85^\circ$ .

На рис. 2 представлены рентгеновские дифрактограммы всех образцов. Все основные дифракционные пики практически совпадают для образцов всех типов, что говорит о невозможности разделения кристаллографического состояния образцов S1, S2 и S3. с помощью структурных методик, использованных в данной работе.

Поведение электросопротивления, магнитных характеристик и ГМИ-откликов различных образцов указывает на различия их структуры и наведенной магнитной анизотропии (рис. 3).



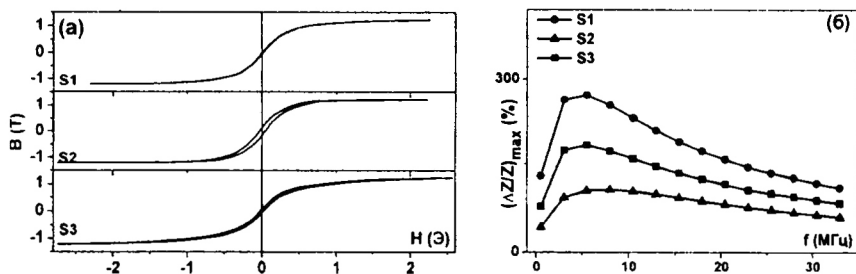


Рис. 3. Петли магнитного гистерезиса(а) и частотные зависимости ГМИ(б) лент FeSiBNbCu после термического воздействия в трех режимах

Увеличение коэрцитивности, уменьшения начальной магнитной проницаемости и увеличение электросопротивления “переотожженных” нанокристаллических сплавов FeSiBNbCu возможно в случае выпадения в них дополнительной мелкодисперсной фазы боридов железа  $\text{Fe}_2\text{B}$ . В работе Ванг и др.<sup>1</sup> показана возможность формирования мелкодисперсной фазы боридов железа  $\text{Fe}_2\text{B}$  в виде двойниковых пластин. Ввиду малого процентного содержания мелкодисперсной фазы боридов железа (~10%), исследование тонких особенностей структуры с помощью рентгеноструктурного анализа невозможно. В работе предлагается объяснение полученных результатов на основе предположения о сильном влиянии магнитного поля, приложенном на этапе нанокристаллизации, на морфологию мелкодисперсных включений.

Целью четвертой главы является установление связи гигантского магнитоимпедансного эффекта с магнитными свойствами неоднородных планарных пленочных структур на основе 3d-металлов (Fe, Ni) при вариации их геометрических параметров (рис. 4).

<sup>1</sup> Wang N., Zhu F. and Haasen P. // Philosophical Magazine Letters.-1991.- V. 64, No. 3.- P. 157-162

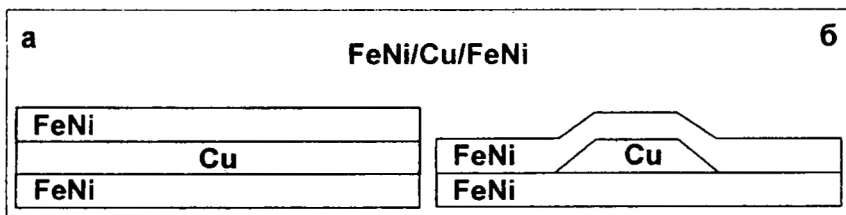


Рис. 4. Пленочные структуры ферромагнетик/немагнитный проводник/ферромагнетик с незамкнутым магнитным потоком(а) и замкнутым магнитный потоком (б)

При выборе толщины FeNi-слоев принималось во внимание, что при получении магнитных пленок путем напыления, возможно появление перпендикулярной магнитной анизотропии. Наличие перпендикулярной анизотропии может привести к «закритическому» состоянию образца, характеризующемуся специфической петлей магнитного гистерезиса, повышенной коэрцитивной силой, вращающейся магнитной анизотропией в плоскости пленки и мелкой полосовой доменной структурой, в доменах которой спонтанная намагниченность ориентирована под углом к плоскости пленки. Существует критическая толщина, при превышении которой появляется перпендикулярная компонента вектора спонтанной намагниченности ( $L_{\text{крит}}(\text{FeNi}) \approx 100 \text{ нм}$ ). Для получения заметного изменения импеданса при малых частотах необходима относительно большая толщина составляющих FeNi-компонент. Поэтому в работе толщина FeNi-компонент составляла 130-175 нм, близкой по порядку к оценочной величине критический толщины перехода в «закритическое» состояние.

В разделе 4.1. исследованы магнитные свойства и ГМИ пленочных структур  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$  при вариации ширины ферромагнитного слоя ( $w$ ) от 12 до 3 м. При уменьшении ширины пленочной структуры до 1 мм ожидается существенное увеличение значения эффекта ГМИ (рис. 5). Важно отметить существование эффекта ГМИ, отличного от нуля (13% для 500 МГц) в структуре FeNi/FeNi толщиной 350 нм, полученного с помощью технологии с разгерметизацией камеры.

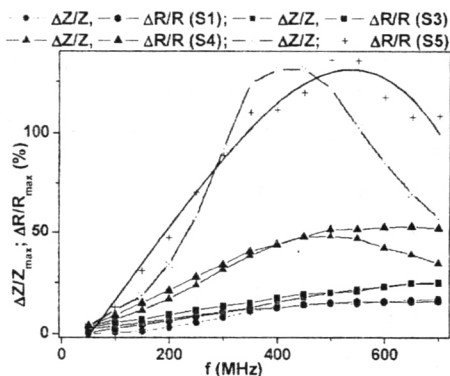


Рис. 5. Частотные зависимости максимальных значений ГМИ для экспериментальных образцов S1 ( $w=12$  мм), S3 ( $w=6$  мм), S4 ( $w=3$  мм) и моделированного образца S5 ( $w=1$  мм).

В разделе 4.2. исследованы магнитные свойства, магнитная доменная структура и ГМИ пленочных структур  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$  при вариации ширины немагнитного слоя с формированием элементов с замкнутым и незамкнутым магнитным потоком. Форма продольных петель магнитного гистерезиса пленочных элементов с замкнутым магнитным потоком (рис. 6(а)) оказалась более усложненной при комплексном типе эффективной магнитной анизотропии.

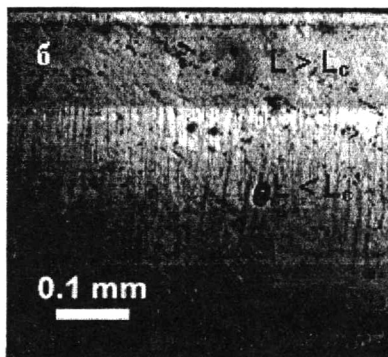
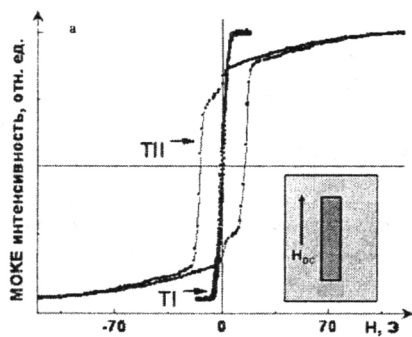


Рис. 6 (а) Петли магнитного гистерезиса для образцов с замкнутым (ТII) и незамкнутым (TI) магнитным потоком. (б) Магнитная доменная структура элемента с замкнутым магнитным потоком

Поверхностная магнитная доменная структура выявляется по всей поверхности образца с незамкнутым магнитным потоком. Для образца с замкнутым магнитным потоком характерно

существование двух четко разграниченных областей, соответствующих участкам структуры типа FeNi/FeNi находящихся в «закритическом» состоянии с мелкой доменной «страйп-структурой» и FeNi/Cu/FeNi, где векторы спонтанной намагниченности лежат в плоскости пленки (рис 6(б)).

Анализ особенностей кривых намагничивания и магнитной доменной структуры указывает на различия в магнитных свойствах и магнитной анизотропии пленочных элементов, которые отражаются на особенностях эффекта ГМИ (рис. 7(а)).

Частотные зависимости ГМИ-отношения элементов с замкнутым магнитным потоком для частот выше 150 МГц и элементов с незамкнутым магнитным потоком для частот выше 200 МГц характеризовались тенденцией к насыщению (рис. 7(б)) Частотные зависимости, полученные с помощью моделирования методом конечных элементов, показывают данные, коррелирующие с экспериментальными.

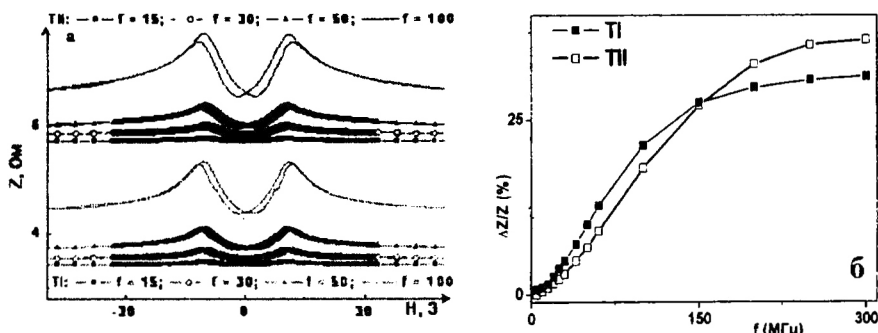


Рис. 7. (а) Полевые зависимости абсолютного значения импеданса пленочных элементов типов TI и TII. Частоты указаны в МГц. (б) Экспериментальная частотная зависимость максимальной величины  $\Delta Z/Z(H)$  для элементов типов TI и TII.

Целью главы 5 является экспериментальное исследование возможности детектирования неоднородных магнитных полей рассеяния, создаваемых ферромагнитными модельными объектами в виде плоских параллелепипедов с различной конфигурацией и положением с помощью ГМИ-планарных структур в виде лент сплава  $\text{Fe}_{2.5}\text{Co}_{64.5}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и пленочной структуры  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ . Детектирование ферромагнитных пластин

происходило на расстоянии 1 мм от плоскости ГМИ-элемента так, что плоскости объекта и элемента были параллельны, а проекции центров плоскостей совпадали. Размеры пластин составляли: FI- 0,65×2×25; FII- 0,65×3×25; FIII - 0,65×5×25 (мм<sup>3</sup>). На рис. 8 показано, что наличие ферромагнитного модельного объекта различной ширины вблизи ГМИ-элемента приводит к значительному изменению формы кривых ГМИ. Для математического описания процессов в системе МИ-элемент-модельный объект необходимо выделить характерные точки на МИ-кривой (например, значение ГМИ в магнитном поле  $H=2$  Э).

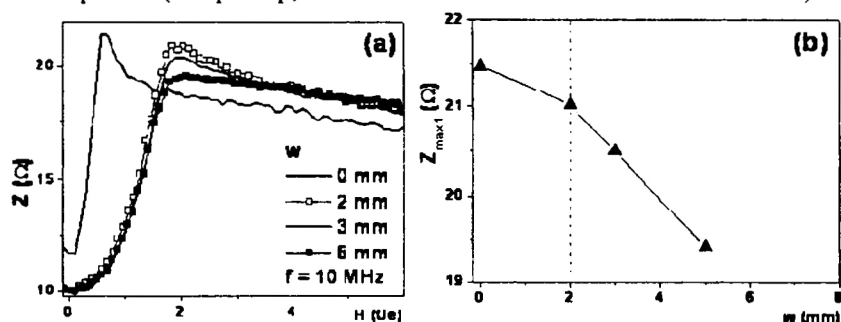


Рис. 8. Полевые зависимости ГМИ для аморфной ленты  $Fe_{2.5}Co_{64.5}Cr_3Si_{13}B_{15}$  при отсутствии (кривая «S-ribbon») и в присутствии ферромагнитных пластин FI, FII и FIII (а). Зависимость величины ГМИ отклика аморфной ленты, находящейся во внешнем магнитном поле  $H=2$  Э от ширины пластины (б)

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Определены и интерпретированы магнитные свойства и ГМИ цепочки состояний композиционно однородных планарных структур в виде быстрозакалённых лент на основе Co и Fe с различной степенью магнитной неоднородности:

- Впервые для лент на основе Co показана корреляция между магнитными свойствами и магнитным импедансом в состояниях с разной степенью малой пластической деформации. С повышением степени деформации происходит изменение процессов намагничивания с усилением роли процессов вращения. Малая пластическая деформация позволяет целенаправленно изменять положение максимума ГМИ.

- Для быстрозакаленных лент  $\text{Fe}_3\text{Co}_{67}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ , не подверженных дополнительным термическим воздействиям, получены максимальные чувствительности 300%/Э, которые превышают чувствительности традиционных МИ-материалов в виде лент, прошедших релаксационный отжиг или отжиг на нанокристаллизацию. Форма кривых МИ может быть описана с помощью модели, предполагающей наличие областей с продольной магнитной анизотропией с незначительной дисперсией локальных осей легкого намагничивания в центральной части образца и поперечной магнитной анизотропии в приповерхностных областях.

- установлено, что частичная нанокристаллизация приводит к значительному снижению максимальной величины ГМИ-эффекта, росту МИ-гистерезиса и появлению асимметрии МИ-кривых. Предложена описание, позволяющая объяснить корреляцию между условиями проведения нанокристаллизации, магнитной предысторией, магнитными свойствами и ГМИ, принимая во внимание поля рассеяния наночастиц магнито жесткой фазы в магнитомягкой матрице.

- установлены закономерности влияния термической и термомагнитной обработок на параметры ГМИ в нанокристаллических сплавах на основе Fe. Показано, что наблюдаемые изменения кривых ГМИ могут быть обусловлены тонкими структурными преобразованиями в лентах, в частности, образованием фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$ , не выявляемой рентгеноструктурными методами.

Предложена схема описания ГМИ-кривых и их эволюции для композиционно однородных планарных структур на основе 3d-металлов с различной степенью магнитной неоднородности, основанная на выделении характерных точек.

2. Определены особенности магнитных свойств, эффективной магнитной анизотропии, доменной структуры и ГМИ пленочных структур  $\text{FeNi/Cu/FeNi}$  различной геометрии

- для пленочных структур с малым отношением «ширина немагнитного слоя/общая ширина» показано, что уширение структуры, необходимое для увеличения активной площади поверхности, приводит к снижению эффекта ГМИ. Величина чувствительности эффекта ГМИ полученная для  $\text{FeNi/Cu/FeNi}$  структур шириной 3 мм делает перспективной разработку ГМИ-

датчиков, например, адаптированных для детектирования крупных биокomпонент.

-для пленочных структур с большим отношением «ширина немагнитного слоя/общая ширина» проведено сравнение структур с незамкнутым и замкнутым магнитным потоком. Для структур с незамкнутым магнитным потоком в интервале частот до 150 МГц характерны более высокие величины ГМИ, чем для элементов с замкнутым магнитным потоком.

3. Разработаны методические основы детектирования планарных ферромагнитных объектов с помощью ГМИ-элемента в виде аморфных лент и пленочной структуры FeNi/Cu/FeNi. В основе детектирования лежит принцип количественной оценки полей рассеяния модельных объектов. Определены интервалы частот, в которых возможен процесс детектирования и условия применения данных элементов.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в журналах, рекомендованных экспертным советом ВАК по физике:*

1. Volchkov S. O., Cerdeira M. A., Gubernatorov V. V., Duhan E. I., Potapov A. P., Lukshina V. A. Effects of Slight Plastic Deformation on Magnetic Properties and Giant Magnetoimpedance of FeCoCrSiB Amorphous Ribbons //Chinese Phys.Lett.-2007.-V.24,N.5.-P.1357-1360.
2. Волчков С.О., Свалов А.В., Курляндская Г.В. Гигантский магнитный импеданс пленочных наноструктур, адаптированных для биодетектирования// Известия высших учебных заведений. Физика.- 2009.- №8 .- с. 3-9
3. Волчков С. О., Лукшина В. А., Потапов А. П., Курляндская Г. В. Чувствительный элемент на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта для детектирования полей рассеяния // Дефектоскопия.-2009.- Т. 47.- стр. 3-9
4. Волчков С.О., Духан Е. И., Губернаторов В. В., Потапов А. П., Лукшина В. А., Cerdeira M.A., Курляндская Г.В. Магнитные свойства и гигантский магнитный импеданс аморфных лент сплава FeCoCrSiB после малой пластической деформации // Физика металлов и металловедение.- 2008.- Т. 106, № 4.- с. 371-377
5. Курляндская Г.В., де Кос Д., Волчков С.О. Магниточувствительные преобразователи для неразрушающего

контроля, работающие на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта//Дефектоскопия.-2009.-Т.45.-с.13-42  
6. Martínez-García J. C., Rivas M., Elbaile L., Díaz-Crespo R., García J. A., Volchkov S. Asymmetrical Magnetoimpedance Effect in Partially Devitrified  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{16}\text{B}_{12}\text{Mo}_2$  Ribbons // Sensor Letters.- 2009.- V. 7.- P. 507–511

*Тезисы в сборниках с номером ISBN:*

7. Волчков С.О. Экспериментальное исследование гигантского магнитного импеданса в объектах с выраженным скин-эффектом // Тезисы студенческих научных работ: Направление «Естественные науки». –Екатеринбург:Изд-во Урал. Ун-та.-2007.-122 с.ISBN5-7996-0278-1

8. Волчков С.О., Лепаловский В.Н., Свалов А.В., Васьковский В.О., Курляндская Г.В. Гигантский магнитоимпедансный эффект пленочных структур FeNi/Cu/FeNi различной геометрии // Третья всероссийская конференция по наноматериалам НАНО-2009. Екатеринбург 20-24 2009 г. – Екатеринбург: Уральское изд-во.-800 с. ISBN 978-5-93667-123-5

9. Семиров А.В., Букреев Д.А., Моисеев А.А., Волчков С.О., Лукшина В.А., Курляндская Г.В. Магнитные свойства и температурная зависимость гигантского магнитоимпедансного эффекта нанокристаллических лент  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ //Третья всероссийская конференция по наноматериалам НАНО-2009. Екатеринбург 20-24 2009 г. – Екатеринбург: Уральское изд-во.-800 с. ISBN 978-5-93667-123-5

10. Курляндская Г.В., Семиров А.В., Лукшина В.А., Волчков С.О., Букреев Д.А., Моисеев А.А. Магнитные свойства и магнитоимпедансный эффект наноструктурных лент  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  с наведенной магнитной анизотропией // Новое в магнетизме и магнитных материалах. Сборник трудов XXI Международной конференции 28 июня – 4 июля 2009г. – с. 856

*Статьи в зарегистрированных научных электронных изданиях:*

11. S.O. Volchkov, A.V. Svalov, G.V. Kurlyandskaya High frequency magnetoimpedance of FeNi/Cu/FeNi sensitive elements with different geometries // Solid State Phenomena.-2009 Vol. 152-153.-P.373-376

*Тезисы конференций:*



12. Volchkov S. O., Cerdeira M. A., Gubernatorov V. V., Dujan E. I., Potapov A. P., and Lukshina V. A.. The effect of slight plastic deformation on magnetic properties and giant magnetoimpedance of FeCoCrSiB amorphous ribbons. // Book of Abstracts of the 6th European Magnetic Sensors and Actuators Conference.
13. Волчков С. О., Балымов К. Г. Измерительный автоматизированный комплекс для исследования магнитных, магниторезистивных и магнитоимпедансных свойств наноструктурных пленочных объектов //Всероссийская молодежная научно-инновационный конкурс – конференция «Электроника - 2006»: тезисы докладов конференции.-М.:МИЭТ.-2006.- 164 с.
14. Волчков С. О. Экспериментальное исследование гигантского магнитного импеданса в объектах с выраженным скин-эффектом // Сборник тезисов, материалы Тринадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-13: материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т.1.- Екатеринбург.- 2007
15. Волчков С.О., Васьковский В.О., Духан Е.И., Курляндская Г.В., Лепаловский В.Н. Магнитные свойства и гигантский магнитный импеданс наноструктурированных планарных элементов // Сборник тезисов IV Российской научно-технической конференции «Физические свойства металлов и сплавов», ФСМиС-IV, 2007 Екатеринбург.
16. Volchkov S.O., Svalov A.V., Kurlyandskaya G.V. High frequency magnetoimpedance of FeNi/Cu/FeNi sensitive elements with different geometries//Сборник тезисов московского международного симпозиума по магнетизму, MISM-2008
17. Martínez-García J.C., Rivas M., Elbaile L., Díaz-Crespo R., García J.A., Volchkov S. O. Asymmetrical Magnetoimpedance Effect In Partially Devitrified  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{16}\text{B}_{12}\text{Mo}_2$  Ribbons//Abstracts Books of 8th European Conference on Magnetic Sensor and Actuators, EMSA 2008
18. Volchkov S.O., Vaskovskiy V. O., Lepalovskij V.N., Duhan E. I., Savin P.A. and Kurlyandskaya G.V. Giant Magnetoimpedance Of FeNi/Cu/FeNi And FeNiCo/Cu/FeNiCo Multilayered Film Structures // Abstracts Book of Euro-Asian Symposium «Magnetism on a Nanoscale», EASTMAG 2007
19. С. О. Волчков, В. А. Лукшина, А. П. Потапов, Г. В. Курляндская Чувствительный элемент на основе гигантского

магнитоимпедансного эффекта для детектирования полей рассеяния // Сборник тезисов XXIV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля»

20. Volchkov S. O., Kurlyandskaya G. V. Giant Magnetoimpedance Stray Field Detector // Abstracts Book of International Magnetics Conference, Intermag 2009

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gromov A., Korenivski V. Electromagnetic analysis of layered magnetic/conductor structures J. Phys. D: Appl. Phys 33 (2000) 773-779.
2. Harrison E.P., Turney G.L., Rowe H. An impedance magnetometer// Nature.- 1935.- №135.- P.961.
3. Beach R.S. and Berkowitz A.E. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire// Appl. Phys. Lett.- 1994.- V.64.- P.3652-3654.
4. Panina L.V., Mohri K., Bushida K., Noda M. Giant magnetoimpedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys// J. Appl. Phys.- 1994.- V.76.- P.6198-6203.
5. Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б., Дьячков А.Л., Парамонов В.П., Перов Н.С., Прокошин А.Ф., Усов Н.А., Лагарьков А.Н. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях//ФММ.-1997.-Т.83.-№6.-С.61-71.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред.- М.: «Наука», 1982.
7. А. А. Анашко, А. В. Семиров, А. А. Гаврилюк Магнитоимпедансный эффект в аморфных FeCoMoSiB лентах // Журнал технической физики.- 2003.-Т. 73, в. 4, с. 49-52
8. А. А. Анашко, А. В. Семиров, А. А. Гаврилюк Влияние отжига на магнитоимпедансный эффект в аморфных FeCoMoSiB лентах // Журнал технической физики.- 2004.-Т. 74, в. 8, с. 128-129
9. А.А.Гаврилюк, А.Л.Семенов, А.Ю.Моховиков Магнитоупругие свойства аморфных ферромагнетиков, обработанных электрическим током//Письма в ЖТФ.- 2005.- Т. 31, № 6, с. 51-56
10. E.E. Shalyguina, Chong-Oh Kim, CheolGi Kim, Young-Woo Rheem, M.A. Komarova, V.V. Molokanov //Near-surface magnetic properties and giant magnetoimpedance of Co-based amorphous ribbons // J. Magn. Magn.Mater., V.258-259 (2003) pp. 174-176.



Подписано в печать 05.11.2009. . Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1.5.  
Тираж 100. Заказ № 162.

Отпечатано в ИПЦ «Издательство УрГУ».  
г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4